

Розробка аналітичної моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі зі змінними кутами нахилу

В. М. Арендаренко, А. В. Антонець, О. М. Іванов, І. А. Дудніков,
Т. В. Самойленко

Існуючі технічні засоби завантаження силосів зерновим матеріалом не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Нагальною залишається проблема травмування зерна, що зумовлює необхідність розробки гравітаційного завантажувача з іншим принципом роботи із відповідним теоретичним обґрунтуванням руху зернового матеріалу в ньому. В роботі представлено і обґрунтовано модель гравітаційного руху зерна у периферійному відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Модель ґрунтується на системі сил в циліндричній системі координат, що діють на об'єм зернового потоку у периферійному гвинтовому каналі. Швидкість зерна у кінці гальмівної ділянки каналу повинна бути якомога меншою, але не менша ніж початкова швидкість потоку на початку розгінної ділянки. Модель враховує цю умову і забезпечує оптимальне проходження зерна на будь-якій ділянці каналу.

Наведена модель дає змогу знаходити швидкість руху зерна у будь-який момент часу, враховує висоту отвору бункера та залежність між кутами нахилу спіралей розгінної та гальмівної ділянок. Для даних кутів наведено математичну залежність, що забезпечує проходження зерна без його згруження і водночас запобігає травмуванню зернової маси за рахунок контрольованого зменшення кінцевої швидкості. Окремо надано залежність для знаходження часу, за якого зерно збільшує швидкість на розгінній ділянці, досягаючи максимального значення.

На основі моделі запропоновано периферійний відкритий гвинтовий канал із двома кутами нахилу спіралей α і β . Для даного каналу встановлено взаємозв'язки між його ключовими параметрами, зокрема обґрунтовано значення рекомендованих кутів $41^\circ \dots 45^\circ$ для розгінної та $39^\circ \dots 35^\circ$ для гальмівної ділянок відповідно, а також відношення h_0/r не менше $0.6 \dots 0.7$.

Ключові слова: швидкість руху зерна, гвинтовий канал, змінні кути нахилу, травмування.

1. Вступ

Важливою проблемою сучасного сільського господарства є збільшення валового виробництва високоякісного зерна. Від його кількості і якості залежить загальна продовольча безпека кожної з країн світу та є запорукою сталого розвитку виробничих об'єктів переробної і харчової галузі [1].

Для збереження зерна на сучасних елеваторах використовують металеві силоси на бетонній основі. Висота їх обмежується несучою здатністю вантажів і не перевищує 30–60 м. Силоси будуються, як правило, для збільшення потуж-

ності підприємства і економії земельних площ. Стінки силосів виготовляються із гофрованої цинкової сталі, це збільшує міцність конструкції і знижує її вагу. Завантажуються силоси зерном за допомогою скребкових транспортерів, котрі знаходяться у верхніх транспортних галереях. Ці транспортери подають зерновий вантаж до завантажувальних отворів силосів.

Із збільшенням відстані від головної споруди елеватора до силосів інтенсивність взаємодії зерна з робочими органами скребкових транспортерів збільшується і, як наслідок, кількість і величина травм також зростає. Тому зерновий вантаж, який транспортується до завантажувальних отворів силосів може мати деякий відсоток уже травмованого зерна.

Потрапивши до завантажувального отвору зерно під дією гравітації вільно падає на дно силосу. Зерновий вантаж, який падає із вершини силосу, не є зв'язаним середовищем, тому його можна розглядати як вертикальний рух окремих зернівок. Зернівки падаючи із значної висоти ударяються об стіни та бетонне дно силосу і травмуються. Гравітаційне завантаження силосів також супроводжується ударом зерна об зерновий насип. Ударна взаємодія ушкодженого і не ушкодженого зерна в середині силосу збільшує кількість травмованого зерна. Дуже часто при таких ударах відбувається ушкодження основної частини зернівки – зародка.

Загальновідомо, що травмоване зерно менш стійке до зберігання, а отримані під час завантаження травми слугують осередком розвитку шкідливих бактерій і мікробів.

Вказані вище проблеми зберігання та транспортування зернової маси залишають актуальними питання обережної загрузки зернівок у силоси та потребують пошуку шляхів контролю швидкості руху зерна для його гравітаційного завантаження без травмування. Для комплексного вирішення задачі обережного завантаження зерна у силоси доцільно розробити та дослідити роботу периферійного відкритого гвинтового каналу із змінними кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянок. Це у свою чергу потребує розробки відповідної фізико-математичної моделі руху зерна по поверхні даного гвинтового каналу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Під час гравітаційного завантаження зерна у силос відбувається неконтрольоване зростання швидкості падіння зернової маси та чисельні силові взаємодії ударного типу з конструктивними елементами силосів. Дані ударні зіткнення спричиняють порушення цілісності зерна з отриманням мікротріщин, поверхневих сколів, розділення на окремі складові та інші негативні наслідки, що у кінцевому випадку призводить до зменшення якості зерна [2, 3].

Вирішення окресленої проблеми вимагає розробки та впровадження технічних рішень та засобів, що здійснюють коректування швидкісного руху зерна, його концентрації у певному об'ємі та контрольованій подачі. Такі дослідження були розпочаті у роботі [4], де було встановлено зв'язок між кутами ділянок спускного прямого каналу з наведенням функціональної залежності між ними для прямолінійного руху. У роботі [5] розглянуто вже гвинтовий канал, який

має тільки розгінну ділянку зі змінним кутом нахилу спіралей, що не дає можливість зменшувати швидкість руху зерна.

Окремим рішенням проблеми травмування є використання завантажувальних пристроїв конусного типу [6], а саме послідовно поєднаних конусних спрямовувачів розташованих по лінії гравітаційного руху зерна. Але широке впровадження даного рішення стикається з громіздким конструктивним виконанням та зменшенням корисного внутрішнього простору силосу. Рух зерна по таким спрямовувачам характеризується ударною взаємодією, що дещо нівелює вирішення проблеми травмування насіння.

В результаті післязбиральної обробки та завантаження зерна 30–40 % насіння мають мікропошкодження [7, 8]. Опис технічних рішень для рівномірного завантаження зерна, що зменшує його травмування, наводиться у роботах [9, 10], але не усуває його повністю, адже зменшення швидкості руху зерна не передбачено.

Транспортування зерна відбувається із залученням механічних транспортерів із робочими органами різного типу: шкребки, гвинти, ланцюги, тарілки, ковші [11, 12]. Дані транспортери запобігають розвитку надмірних швидкостей, але не вирішують проблеми травмування. Взаємодія робочих органів транспортерів із зерном викликає його інтенсивне перемішування та зношення внаслідок взаємодії з оточуючими поверхнями. Зокрема, при використанні однієї норії рівень травмування може досягати 2–5,6 % [13], у технологічному ланцюгу таких норій може бути декілька, тому рівень пошкодження є досить суттєвим. Нерідко дані транспортні засоби використовуються лише для доставки зерна до завантажувального патрубку силосу, звідки воно вільно падає до нижньої частини силосу, отримуючи неминучі пошкодження. При цьому збільшення висоти падіння зерна у 3 рази, призводить до підвищення кількості ушкоджених зернівок більше ніж у 8 разів [14].

Травмоване зерно має більшу інтенсивність дихання, що є ще одним негативним наслідком при не контрольованій швидкості його завантаження. Даний показник у 1,8 рази перевищує значення не травмованого зерна [10]. Внаслідок інтенсивного дихання відбувається значне виділення тепла і вологи, що призводить до пошкодження або повної загибелі насіння. Водночас, під дією швидкого гравітаційного завантаження така травмована маса в нижніх шарах більш ущільнюється, що негативно впливає на міцність зерна [15], викликає його злежування та деформацію [16].

При завантаженні силосів компактным швидким струменем спостерігається сегрегація зернового насипу. Вплив сегрегації на якість зернової продукції як правило є негативним. У [17, 18] наведено узагальнені результати з питань швидких гравітаційних потоків зернистих матеріалів у лотках, каналах та похилих площинах, в той же час аспекти сегрегації та зменшення травмування зерна залишилися не висвітлені. Водночас у роботах [19, 20] стверджується, що гравітаційні потоки зернистих матеріалів супроводжуються ефектами сегрегації, але шляхи подолання цієї проблеми в них не розглянуті.

На практиці для зменшення травмування зерна при його завантаженні часто використовують спеціальні пристрої: пересипні полиці встановлені у телескопічній трубі, концентричні кільця з вертикально розміщеними лопатями, вер-

тикальні гвинтові конвеєри з вікнами, нерухомі жолоби [21]. Широко поширені також пустотілі зрізані конуси як гравітаційні розподільники під завантажувальною горловиною силосу [22, 23]. Запропоновані у [21–23] конструкції зменшують травмування зерна і динамічне ущільнення насипу, але є громіздкими і не вирішують питання контрольованого зменшення швидкості руху зерна при його завантаженні у силоси.

Ще одним способом завантаження силосів є використання вертикальних гвинтових конвеєрів. В роботах [23, 24] проведені теоретичні дослідження руху зернівок по гвинтовій поверхні. Такий рух забезпечує обережне завантаження ємності зерном. Недоліком такого способу є наявність в середині ємності громіздкої каскадної споруди та відсутність окремої гальмівної ділянки, що не дає можливість зменшувати швидкість руху зерна.

Варіантом подолання проблеми без ударного завантаження силосів зерном є створення різноманітних каскадних пристроїв, які зменшують висоту вільного падіння зерна на дно ємності. Процес руху зернового матеріалу в каскадних гравітаційних сепараторах описує стаття [25]. У [26, 27] наведено результати теоретичних досліджень даного гравітаційним руху зерна по різних робочим органам. Такий рух має високу швидкість і супроводжується активною взаємодією частинок між собою і робочим органом, а це негативно впливає на процес завантаження зерна та його довготривале зберігання. Зазначимо також, що каскадний спосіб завантаження зерна характеризується суттєвою просторовою неоднорідністю [28, 29]. Дана неоднорідність зумовлює у центральній частині зернового шару найбільшу концентрацію твердої фази та підвищений вміст крупного і щільного зерна. В той же час, на периферійних частинах потоку, які характеризуються підвищеним між зерновим простором, має місце більш висока концентрація легких частинок.

Окрема увага науковців присвячена проблемі розробки фізико-математичних моделей руху зерна. Зокрема у дослідженнях [30, 31] розглянуто рух частинок сферичної форми по поверхнях сільськогосподарських машин та рух зерна по рухомим поверхням висівних машин відповідно. Зокрема в [30] наводяться залежності для визначення розміщення зерна, але не швидкості його руху. Робота [31] містить аналітичні залежності для визначення траєкторії руху зернин по поверхні диска та швидкості обертання масиву насіння, але не враховує його відхилень від правильної конічної форми. У роботах [32, 33] представлено математичні моделі руху зерна у повітряному потоці та у циліндричному решеті, що обертається. Зокрема, у роботі [32] побудовано математичну модель руху часточки обчесаного вороху, яка встановлює залежність між швидкістю руху часточки і швидкістю повітряного потоку, але у неявному вигляді. Це значно ускладнює знаходження реальної швидкості і потребує додаткових механіко-математичних досліджень. В той же час, модель у [33] представлена диференціальними рівняннями, що описують рух вороху по циліндричному решету, яке обертається навколо осі під кутом до горизонту. Модель представлена окремою обертальною та поступальною складовою руху в неявній формі і призначена перш за все для виявлення ефективних режимів роботи для очистки зерна. Розглянуті вище фізико-математичні моделі націлені переважно на вирішення завдань очистки та обробки

зернової маси. Моделі не мають можливостей для контролю швидкості руху зерна, зокрема не описують його гравітаційний рух по спіралі з двома змінними кутами нахилу для розгінної і гальмівної ділянок.

Отже, незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених питанням травмування зерна при його обробці, транспортуванні та завантаженні у силос, проблема досі залишається не до кінця вирішеною. Існуючі технічні засоби завантаження силосів зерновим матеріалом, а також наявні теоретичні фізико-математичні моделі та практичні дослідження, не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Зокрема, у розглянутих вище пристроях, методах та підходах науковців недостатньо освітлена проблема, регулювання, контролю та зменшення швидкості руху зерна під час виконання операції його завантаження у силоси. Нагальною також залишається проблема громіздкості конструкцій. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність розробки гравітаційного завантажувача з іншим принципом роботи та відповідним теоретичним обґрунтування руху зернового матеріалу в ньому.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Це дасть змогу покращити технологію завантаження силосів зерновим матеріалом без травмування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступний перелік задач, а саме:

- обґрунтувати вигляд та структуру теоретичної моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі;
- знайти співвідношення між кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок;
- дослідити параметри аналітичної моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із різними кутами нахилу ділянок спуску;
- на основі проведених теоретичних досліджень запропонувати технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу із різними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок;
- представити результати експериментальних досліджень та порівняти їх з розрахунковими теоретичними даними досліджуваної моделі.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Система сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у відкритому гвинтовому каналі

Дослідження швидкості руху зерна проводиться для відкритого гвинтового каналу, що має розгінну та гальмівну ділянки із відповідними змінними кутами нахилу. Дана модель ґрунтується на системі сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат (рис. 1).

Гравітаційне переміщення зернової маси по гвинтовому каналу відбувається під впливом рушійної сили $\vec{F}_{\text{руш}} = m\vec{a}$, що визначається з балансу сил, діючих на окреслену рухому масу:

$$\vec{F}_{руш} = \sum \vec{F}_k \text{ або } m\vec{a} = \sum \vec{F}_k, \quad (1)$$

де $\sum \vec{F}_k$ – сума всіх сил, що діють на виокремлену масу зернового потоку у гвинтовому каналу.

Із врахуванням обертально-поступального характеру руху зерна у гвинтовому каналі баланс сил у векторній формі буде мати наступний вигляд:

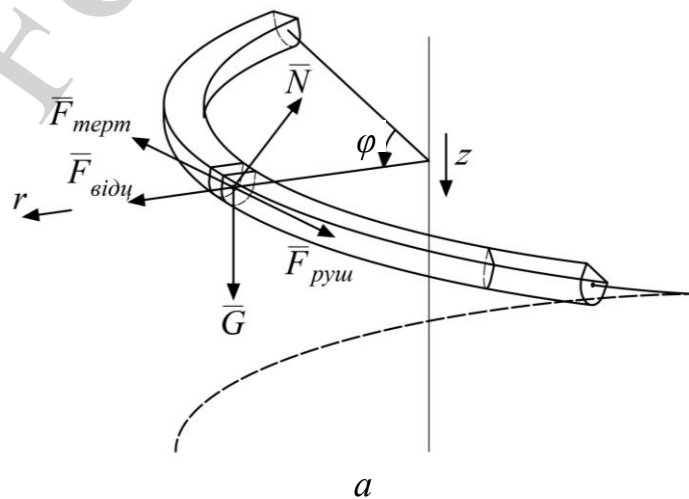
$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{терт}} + \vec{F}_{\text{відц}} + \vec{N} + \vec{G}, \quad (2)$$

де $\vec{F}_{\text{терт}}$ – сила тертя зернового потоку об поверхню гвинтового каналу; $\vec{F}_{\text{відц}}$ – відцентрова сила, що діє на зерновий потік при обертовому русі зернового потоку навколо центральної осі гвинтового каналу; \vec{N} – сила нормальної реакції поверхні гвинтового каналу; \vec{G} – сила гравітаційного тяжіння.

Здійснюючи проектування усіх складових на відповідні напрямки циліндричної системи координат, баланс сил може бути представлений у вигляді наступної системи сил проекцій:

$$\begin{cases} ma_r = F_{\text{відц}}^r - N^r, \\ ma_\phi = -F_{\text{терт}}^\phi + N^\phi, \\ ma_z = -F_{\text{терт}}^z - N^z + G^z, \end{cases} \quad (3)$$

де a_r , a_ϕ , a_z – проекції прискорення зернової маси m за радіальним, кутовим та висотним напрямком циліндричної системи координат; $F_{\text{відц}}^r$, N^r – проекції відцентрової сили та нормальної сили реакції опори за радіальним напрямком; $F_{\text{терт}}^\phi$, N^ϕ – проекції сили тертя та нормальної сили реакції опори за кутовим напрямком; $F_{\text{терт}}^z$, N^z , G^z – проекції сили тертя, нормальної сили реакції опори та сили гравітаційного тяжіння за висотним напрямком.



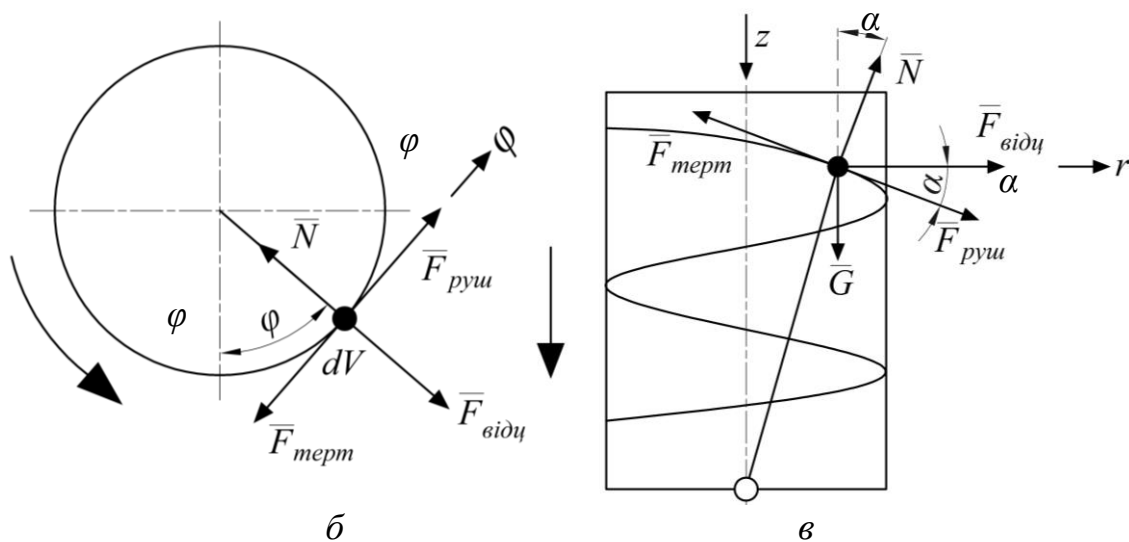


Рис. 1. Система сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат: a – у просторовому відображенні; b – у горизонтальному відображенні; c – у вертикальному відображенні

4. 2. Методика та програма проведення експериментальних досліджень швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі

Метою проведення експериментальних досліджень є визначити характер зміни кінематичних параметрів руху зерна від факторів впливу та провести їхнє співставлення з теоретично обрахованим. Це дасть змогу визначити рівень збіжності отриманих результатів та скласти висновок про адекватність і точність запропонованої аналітичної моделі.

У якості кінематичних параметрів, що аналізуються, були вибрані максимальна та кінцева швидкість руху зерна.

Відповідно до поставленої мети дослідних експериментів була сформована програма досліджень з двох етапів.

На першому етапі визначався характер зміни величини максимальної швидкості руху зерна на розгінній ділянці в залежності від геометричних параметрів цієї ділянки. Кількість факторів, що мають безпосередній вплив на формування даного критерію, є досить значним, тому з метою зменшення кількості дослідів варіативній зміні піддавались лише декілька. Зокрема, змінювався кут нахилу α ділянки розгону та радіус гвинтового каналу r при умові незмінності кількості витків n_p та сталості висоти падіння зерна h_o .

На другому етапі досліджувалась кінцева швидкість зерна при сході з каналу. Дослідження здійснювалось при зміні кута нахилу розгінної та гальмівної ділянки та фіксованих інших параметрах, співвідношення, що визначає залежність між кутами зберігалось.

З метою отримання достовірних даних у кожній комбінації змінних факторів з рівнем значущості 5 %, було заплановано проведення п'яти паралельних експериментів.

Отримані результати експериментальних досліджень опрацьовувались за стандартною методикою статистичної обробки даних. А саме: перевірка на однорідність дисперсій дослідів за критерієм Кохрена, перевірка нормального розподілу залишкового ряду за RS критерієм, знаходження відносної похибки залишків та їх статистичних оцінок, визначення коефіцієнта множинної кореляції, співставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень за величиною відносних похибок між ними. Дані дослідження є підставою для оцінки точності та адекватності запропонованої моделі.

Процедура проведення дослідів передбачала зміну геометрії гвинтового каналу під вибрані для кожного етапу параметри та циклічного проведення експериментів з необхідною періодичністю та рівнем повторюваності.

У якості зернового матеріалу було вибрано зерно пшениці озимої зі середньою вологістю 14 %.

Відстеження у часі переміщення зернового потоку (окремо виділених яскравою фарбою його частинок) по гвинтовому каналу при експериментальних дослідженнях здійснювалось за використанням високочастотної відеотехніки. Покадровий аналіз відзнятого матеріалу дозволив визначати місце розташування ключових частинок зернового потоку у гвинтовому каналі та обраховувати часову тривалість їхнього переміщення. За величиною пройденого шляху та тривалістю переміщення між ними визначались швидкості руху зерна.

5. Результати дослідження руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із різними кутами нахилу ділянок спуску

5. 1. Аналітичний опис гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі

Проекції вектору прискорення \vec{a} у системі (3) за кожним із напрямків циліндричної системи координат, з урахуванням відсутності руху зернової маси у радіальному напрямку, можна визначити з виразів:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\varphi = r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Так як переміщення зернової маси у радіальному напрямку відсутнє, то координата r приймає стале значення, а складова $\frac{dr}{dt}$ у системі рівнянь (4) нівелюється і дана система приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\phi = r \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Беручи до уваги нульове радіальне прискорення $a_r=0$, система рівнянь (3) дещо спрощується:

$$\begin{cases} F_{\text{відц}}^r = N^r, \\ ma_\phi = -F_{\text{терт}}^\phi + N^\phi, \\ mv_z = -F_{\text{терт}}^z - N^z + G^z. \end{cases} \quad (6)$$

Відцентрова сила, що діє на зернову масу при її обертанні навколо осі гвинтового каналу, визначається з виразу:

$$F_{\text{відц}} = mr\omega^2, \quad (7)$$

де r – відстань від осі гвинтового каналу до центру ваги зернової маси; ω – кутова швидкість обертання зернової маси.

Сила тертя $F_{\text{терт}}$:

$$F_{\text{терт}} = \mu \cdot N, \quad (8)$$

де μ – коефіцієнт тертя зерна об поверхню гвинтового каналу, N – сила нормальної реакції опори.

З урахуванням залежностей (7) та (8) система рівнянь (6) приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\phi = -\mu N^\phi \cos \alpha + N^\phi, \\ ma_z = -\mu N^z \sin \alpha - N^z + mg. \end{cases} \quad (9)$$

Після виділення спільних множників та їх групування система (9) набуде вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = N^\varphi(1 - \mu \cos \alpha), \\ mv_z = mg - N^z(1 + \mu \sin \alpha). \end{cases} \quad (10)$$

Проекції сили нормальної реакції опори N_φ та N_z можуть бути знайдені шляхом їхнього проектування на напрямок дії сили гравітаційного тяжіння (рис. 1):

$$\begin{cases} N_\varphi = G \sin \alpha, \\ N_z = G \cos \alpha, \end{cases} \text{ або } \begin{cases} N_\varphi = mg \sin \alpha, \\ N_z = mg \cos \alpha, \end{cases} \quad (11)$$

де α – кут нахилу гвинтової лінії на певній ділянці гравітаційного каналу.

З урахуванням виразів (11), система (10) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = (1 - \mu \cos \alpha) \cdot mg \cdot \sin \alpha, \\ ma_z = mg - (1 + \mu \sin \alpha) \cdot mg \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

Після скорочень та тригонометричних перетворень маємо:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ a_\varphi = g \cdot (\sin \alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha), \\ a_z = g(1 - \cos \alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (13)$$

Проводячи заміну проекцій прискорень a_φ та a_z їх виразами з системи рівнянь (5), система (13) формується таким чином:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ r \frac{d^2\varphi}{dt^2} = g(\sin \alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ \frac{d^2z}{dt^2} = g(1 - \cos \alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (14)$$

Приведемо наступну заміну:

$$K_1 = \frac{1}{r} g (\sin \alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha),$$

$$K_2 = g(1 - \cos \alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \quad (15)$$

Тим самим система (13) приводиться до наступного вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} = K_1, \\ \frac{d^2z}{dt^2} = K_2. \end{cases} \quad (16)$$

Для пошуку аналітичного вирішення складеної системи диференціальних рівнянь, проведемо подвійне інтегрування:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d\varphi}{dt} = K_1t + C_1, \\ \frac{dz}{dt} = K_2t + C_3, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \varphi = 0.5K_1t^2 + C_1t + C_2, \\ z = 0.5K_2t^2 + C_3t + C_4. \end{cases} \quad (18)$$

Отримані сталі інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 можуть бути знайдені, заданням відповідних граничних умов.

Загальний пройдений шлях зерною масою по гвинтовому каналу, з урахуванням характеру зміни координат φ та z відповідно до системи рівнянь (18), можна знайти з виразу:

$$l = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2}. \quad (19)$$

Швидкість V переміщення зернової маси, з урахуванням $V = \frac{d\ell}{dt}$, визначається:

$$V = \frac{r^2\varphi(t)\frac{d}{dt}\varphi(t) + z(t)\frac{d}{dt}z(t)}{\sqrt{r^2(\varphi(t))^2 + (z(t))^2}}. \quad (20)$$

Якщо гвинтовий канал має єдиний кут нахилу спіралі α , то канал не має гальмівної ділянки і зернова маса постійно збільшує свою швидкість. Тобто відповідно до (20) маємо швидкість руху зерна для розгінної ділянки:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}}. \quad (21)$$

Для запобігання травмування зерна необхідно, щоб швидкість руху маси зерна істотно не зростала. Для цього наведену гвинтову установку (рис. 1) доцільно удосконалити і умовно розділити на розгінну та гальмівну ділянки, з довжинами спіралей l_p та l_{Γ} і кутами їх нахилу до горизонту α та β відповідно. Тобто швидкість зерна наприкінці розгінної ділянки буде максимальною V_{\max} . При цьому остаточна швидкість зерна в кінці гальмівної ділянки повинна бути якомога меншою, але не менша ніж початкова швидкість потоку на початку розгінної ділянки, тобто $V_{\text{поч}} \leq V_{\text{кін}}$. Остання умова забезпечує проходження зерна без його згруження на будь-якій ділянці каналу. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою $V_{\text{поч}} = V_{\text{кін}} = V_0$.

Початкову швидкість V_0 зерно набуває в результаті падіння з отвору бункера, що розміщений на висоті h_0 від краю каналу розгінної ділянки. В момент падіння маси з отвору бункера на початковий край каналу відбувається перехід її потенціальної енергії в кінетичну, в результаті чого зерно набуває швидкості V_0 . Із закону збереження енергії $mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$. Отже, початкова швидкість зерна:

$$V_0 = \sqrt{2gh_0}. \quad (22)$$

Подальше дослідження швидкості руху зерна потребує відшукування математичної залежності між дискретно змінними кутами α та β нахилу спіралей гвинтового каналу до горизонту.

5. 2. Знаходження співвідношення між кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок гвинтового каналу

Для знаходження співвідношення, що визначатиме математичну залежність між кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянки α і β , відповідно до умови $V_{\text{поч}} = V_{\text{кін}} = V_0$, скористаємось результатами попередніх досліджень [2] для прямих розгінних та гальмівних ділянок. Крім сили тертя, реакції опори та сили

тяжіння також врахуємо дію на зерно відцентрової сили з прискоренням $a = \frac{V^2}{r}$ під час його руху по гвинтовій лінії. Відповідно до закону збереження енергії отримаємо і розв'яжемо систему рівнянь, що описує перетворення кінетичної та потенціальної енергії зернового потоку на розгінній та гальмівній ділянці циліндричної спіралі:

$$\begin{cases} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}, \\ \frac{mV_0^2}{2} + mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}, \\ \frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2}. \end{cases} \quad (23)$$

Прирівнявши друге і третє рівняння системи (23) та спростивши вираз отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{mV_0^2}{2} + mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha + \\ & + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2}, \\ & mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha + \\ & + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = 0, \\ & l_p \sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_p \cos \alpha + \\ & + l_r \sin \beta - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_r \cos \beta = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Для спрощення подальшого розв'язку (24) приймемо довжини розгінної та гальмівної ділянки однаковими, тобто $l_p = l_r$:

$$\sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \sin \beta - \mu \cos \beta = 0. \quad (25)$$

З рівняння (25) маємо:

$$\sin \alpha + \sin \beta = \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \beta,$$

$$\sin \frac{\alpha + \beta}{2} = \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \frac{\alpha + \beta}{2},$$

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) - \alpha. \quad (26)$$

Для спрощення (26) покладемо швидкість руху зерна V , яка безпосередньо впливає на відцентрове прискорення, рівною V_0 :

$$V = V_0 \rightarrow V^2 = V_0^2 = 2gh_0. \quad (27)$$

З (26) враховуючи (27) остаточно маємо залежність між кутами розгінної та гальмівної ділянки:

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha. \quad (28)$$

5.3. Дослідження параметрів аналітичної моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із різними кутами нахилу ділянок спуску

Враховуючи (28) запишемо коефіцієнти розгінної ділянки (15) для гальмівної частини спіралі з кутом нахилу β :

$$K_1^\Gamma = \frac{1}{r} g (\sin \beta - 0.5 \mu \sin 2\beta),$$

$$K_2^\Gamma = g (1 - \cos \beta - 0.5 \mu \sin 2\beta),$$

або

$$K_1^\Gamma = \frac{1}{r} g \left(\sin \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - 0.5 \cdot \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \right),$$

$$K_2^\Gamma = g \begin{pmatrix} 1 - \cos \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - \\ - 0.5 \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Враховуючи (29) перепишемо систему (18) для гальмівної ділянки у вигляді:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \varphi^\Gamma = 0.5K_1^\Gamma t^2 + C_1 t + C_2, \\ z^\Gamma = 0.5K_2^\Gamma t^2 + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (30)$$

Знаючи (30) з (20) отримаємо рівняння швидкості зернової маси для гальмівної ділянки гвинтового каналу:

$$v^\Gamma = \frac{r^2 \varphi^\Gamma(t) \frac{d}{dt} \varphi^\Gamma(t) + z^\Gamma(t) \frac{d}{dt} z^\Gamma(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^\Gamma(t))^2 + (z^\Gamma(t))^2}}. \quad (31)$$

Для подальшого розв'язку врахуємо наступні факти:

– на розгінній ділянці швидкість зерна зростає з V_0 до V_{\max} за проміжок час $[0; t_p]$;

– на гальмівній ділянці швидкість починає зменшуватись і за проміжок часу $(t_p; t_{\max}]$ спадає до V_0 .

Для знаходження рівняння, яке б визначало миттєву швидкість руху зерна в будь-який момент часу на обох ділянках потрібно визначити час t_p . За цей час зерно переходить із розгінної до гальмівної частини, а швидкість досягає максимального значення.

Знаючи крок розгінної ділянки гвинтової лінії S та кількість її витків n_p з кутом їх нахилу α відшукаємо спочатку висоту h_p цієї ділянки.

Для цього знайдемо довжину витка та довжину розгінної ділянки l_p в цілому:

$$S = \pi dtg\alpha = 2\pi r tg\alpha,$$

$$\begin{aligned} l_0 &= \sqrt{(2\pi r)^2 + S^2} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + (2\pi r tg\alpha)^2} = \\ &= \sqrt{4\pi^2 r^2 + 4\pi^2 r^2 tg^2\alpha} = 2\pi r \sqrt{1 + tg^2\alpha}, \end{aligned}$$

$$l_p = n_p l_0 = n_p 2\pi r \sqrt{1 + tg^2\alpha}. \quad (32)$$

З іншого боку, визначивши крок витка гвинтової спіралі отримаємо:

$$S = \frac{h_p}{n_p}, \quad l_0 = \sqrt{(2\pi r)^2 + \left(\frac{h_p}{n_p}\right)^2} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + \left(\frac{h_p}{n_p}\right)^2},$$

$$l_p = n_p l_0 = n_p \sqrt{4\pi^2 r^2 + \frac{h_p^2}{n_p^2}} = \sqrt{4\pi^2 r^2 n_p^2 + h_p^2}. \quad (33)$$

Знайдемо h_p прирівнявши праві сторони рівнянь (32) і (33):

$$2n_p \pi r \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} = \sqrt{4\pi^2 r^2 n_p^2 + h_p^2}, \quad h_p = 2n_p \pi r \tan \alpha.$$

Знаючи h_p знайдемо час проходження зерна по розгінній ділянці t_p , для цього використаємо рівняння $z(t)$ системи (18), прирівнявши $z=h_p$:

$$z = h_p = 0.5K_2 t^2 + C_3 t + C_4,$$

$$K_2 t^2 + 2C_3 t + 2C_4 - 2h_p = 0,$$

$$t_{1,2} = \frac{-2C_3 \pm 2\sqrt{C_3^2 - 2K_2(C_4 - h_p)}}{2K_2},$$

$$t_p = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2(C_4 - 2n_p \pi r \tan \alpha)}}{K_2}. \quad (34)$$

Довжина спіралі каналу складається з однакових довжин розгінної та гальмівної ділянок. З (19) знайдемо загальну довжину гвинтової спіралі відповідно до цих ділянок:

$$\begin{aligned} l &= l_p + l_\Gamma = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2} = \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^p)^2 + (z^p)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^\Gamma)^2 + (z^\Gamma)^2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Запишемо узагальнену формулу швидкості переміщення $V = \frac{dl}{dt}$:

$$V = \left(\frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^p)^2 + (z^p)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^\Gamma)^2 + (z^\Gamma)^2} \right)'.$$

Враховуючи спадання швидкості на гальмівній ділянці гвинтової спіралі отримаємо:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}} - \frac{r^2 \varphi^\Gamma(t) \frac{d}{dt} \varphi^\Gamma(t) + z^\Gamma(t) \frac{d}{dt} z^\Gamma(t)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^\Gamma(t))^2 + (z^\Gamma(t))^2}}. \quad (36)$$

Приймаючи рівність довжин розгінної та гальмівної ділянок $l_p = l_\Gamma$, аналогічно до (32)–(34) визначаємо кількість витків гальмівної ділянки n_Γ , час її проходження зерном t_Γ та час t_{\max} :

$$n_\Gamma = \frac{l_p}{2\pi r \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad (37)$$

$$t_\Gamma = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2^\Gamma (C_4 - 2n_\Gamma \pi r \operatorname{tg} \beta)}}{K_2^\Gamma}. \quad (38)$$

$$t_{\max} = t_p + t_\Gamma. \quad (39)$$

Враховуючи співвідношення (18), (21), (22), (28)–(31), (34)–(39) остаточно отримуємо шукану модель швидкості руху зерна по гвинтовому каналу у вигляді системи рівнянь:

$$V = \begin{cases} \sqrt{2gh_0}, & \text{при } t = 0, \\ \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}}, & \text{при } t \in (0; t_p], \\ \frac{r^2 \varphi^p(t_p) \frac{d}{dt} \varphi^p(t_p) + z^p(t_p) \frac{d}{dt} z^p(t_p)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^p(t_p))^2 + (z^p(t_p))^2}} - \\ - \frac{r^2 \varphi^\Gamma(t - t_p) \frac{d}{dt} \varphi^\Gamma(t - t_p) + z^\Gamma(t - t_p) \frac{d}{dt} z^\Gamma(t - t_p)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^\Gamma(t - t_p))^2 + (z^\Gamma(t - t_p))^2}}, & \text{при } t \in (t_p; t_{\max}), \\ \sqrt{2gh_0}, & \text{при } t = t_{\max}. \end{cases} \quad (40)$$

Початкова швидкість зерна на початку розгінної ділянки у другому та третьому рівняннях моделі (40) враховується у (18) за допомогою початкових умов

$C_1 \dots C_4$. Аналогічні початкові умови для руху по гальмівній ділянці визначаються із (30) і залежать від максимальної швидкості V_{\max} , що набуває зерно наприкінці розгінної ділянки.

Наведена модель визначає швидкість руху зерна у будь-який момент часу як по розгінній так і по гальмівній частині гвинтового каналу із дискретно змінними двома кутами нахилу спіралей.

5. 4. Технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу із різними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок

Периферійний відкритий гвинтовий канал (ПВГК) складається із розгінної і гвинтової гальмівної ділянок, які встановлюються під різним кутом до горизонту. ПВГК кріпиться на внутрішній частині силосу з можливістю регулювання кутів спуску. По мірі заповнення силосу зерном засипається у відкритий гвинтовий канал.

Силос із ПВГК (рис. 2) складається з циліндричної ємності 1, завантажувального отвору 2, периферійного відкритого гвинтового каналу 3 з дискретно змінними кутами нахилу. Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий матеріал з верхньої частини силосу до ПВГК. Тіло гвинтового каналу 3 утворено шляхом повертання U- подібного профілю за гвинтовою лінією зі змінними кутами на розгінній 4 і гальмівній 5 ділянках.

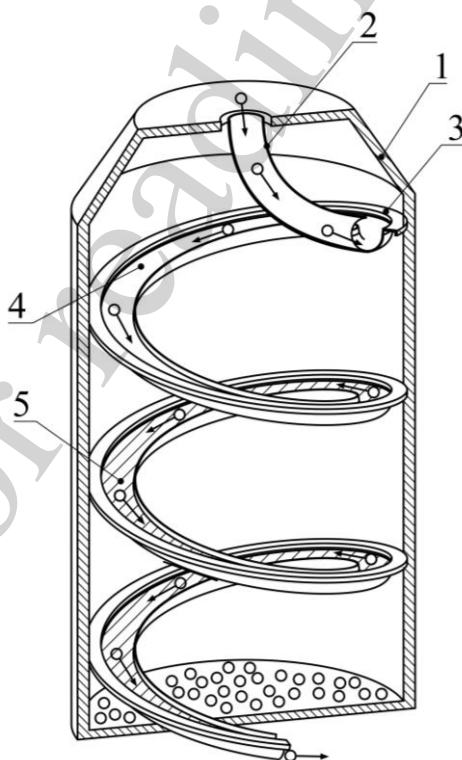


Рис. 2. Силос із периферійним відкритим гвинтовим каналом: 1 - циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок; 3 – периферійний відкритий гвинтовий канал; 4 – розгінна ділянка; 5 – гальмівна ділянка

Представлений гвинтовий канал враховує відомі теоретичні та експериментальні дослідження науковців та спирається на проведене моделювання гравітаційного руху зерна у гвинтовому каналі зі змінним кутом нахилу.

5. 5. Результати експериментальних досліджень та аналіз моделі.

Формування геометрії гвинтового каналу в першу чергу вимагає визначитися з кутами нахилу обох ділянок каналу. Використовуючи залежність (28) між даними кутовими параметрами, була побудована поверхня відгуку (рис. 3), що ілюструє характер зміни кута нахилу гальмівної ділянки від кутового параметра ділянки розгону та співвідношення початкової висоти h_o падіння зерна у гвинтовий канал до радіуса r цього каналу.

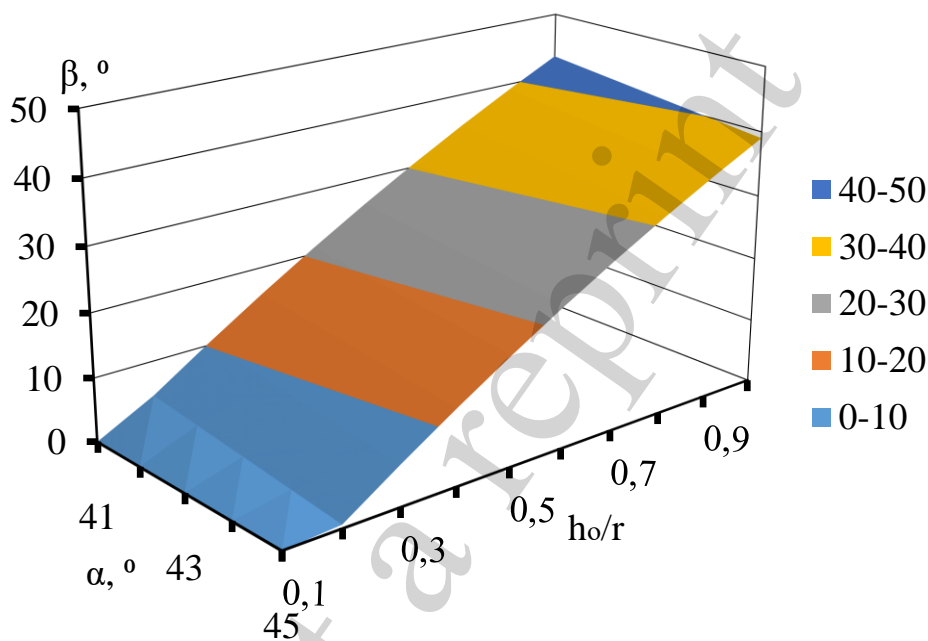


Рис. 3. Співвідношення кутів α розгінної та β гальмівної ділянки з врахування співвідношення h_o/r

На рис. 4 відображені результати розрахунку необхідної кількості витків для гальмівної ділянки n_r при довільно вибраній чисельності витків ділянки розгону n_p . Розрахунки проводились при сталому співвідношенні $h_o/r=0.7$, висоті гвинтового каналу 1.5–2.5 м та в діапазоні зміни кута α від 41° до 45° .

З метою перевірки адекватності складеної моделі руху зернового потоку по гвинтовому каналу та визначення ступеня відповідності отриманих розрахунковим шляхом параметрів руху їх еквівалентним величинам в реальних умовах протікання гравітаційного руху зерна було здійснено ряд експериментальних досліджень. Дослідження проводились на лабораторному зразку периферійного відкритого гвинтового каналу з різними кутами нахилу ділянок спуску. Рух зернового потоку у гвинтовому каналі у ході проведення теоретичних та експериментальних дослідженнях оцінювався кількома важливими кінематичними параметрами. До таких було віднесено максимальна швидкість розгону та кінцева швидкість сходження зерна з гвинтового каналу.

Стосовно дискретності зміни факторів впливу, то для першого етапу досліджень було прийнято наступне: висота гвинтового каналу – 2 м; співвідношення h_0/r вибиралось дискретно (0.7, 0.8, 0.9); кількість витків $n_p=1$; кут α змінювалась від 41° до 45° з кроком в 1° ; коефіцієнт тертя зернового матеріалу при русі по металевому каналу приймався рівним $\mu=0.3$.

На рис. 5 відображено характер зміни максимальної швидкості розгону у вибраному діапазоні зміни кута α , у таблиці 1, як приклад, приведені результати співставлення теоретичних та експериментальних досліджень при $h_0/r=0.7$.

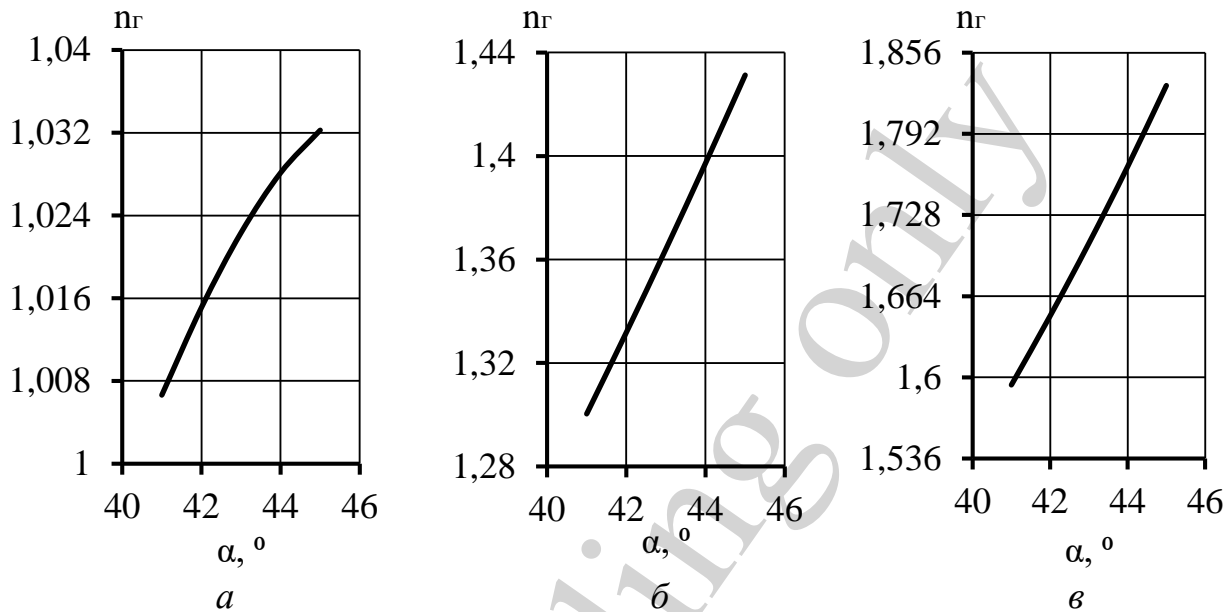


Рис. 4. Кількість витків гальмівної ділянки в залежності від кута α та n_p при $h_0/r=0.7$: а – $n_p=0.8$; б – $n_p=1$; в – $n_p=1.2$

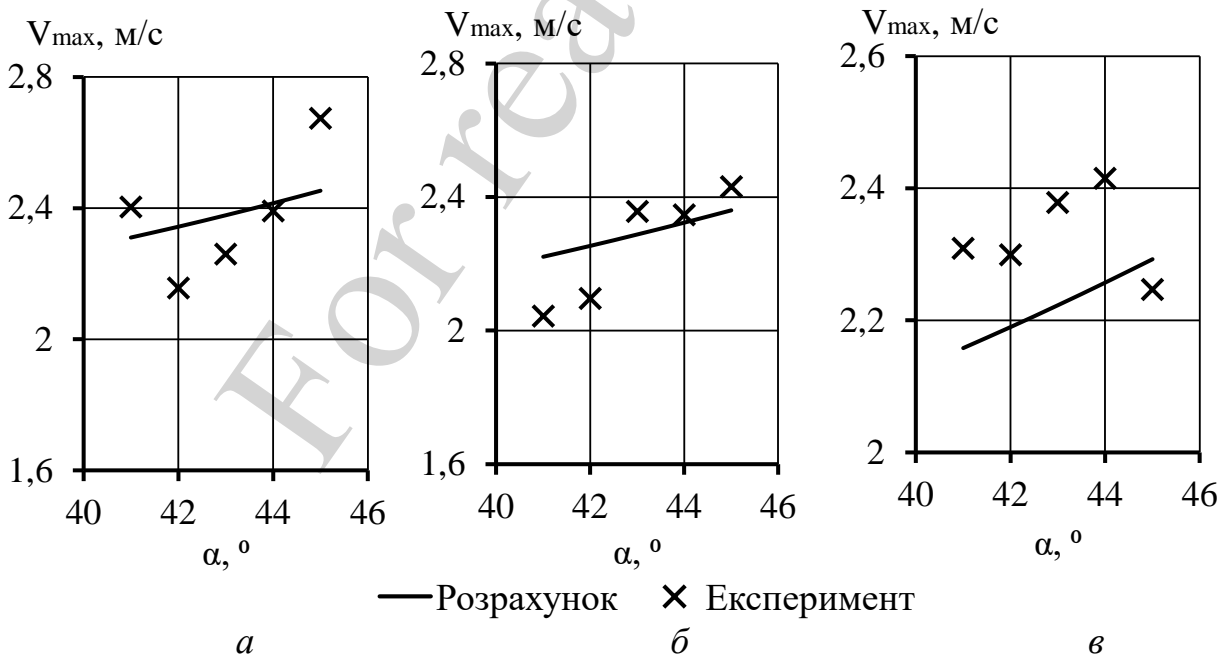


Рис. 5. Зміна максимально досяжної швидкості руху зернового потоку на розгінній ділянці в залежності від кута α та співвідношення h_0/r при $n_p=1$: а – $h_0/r=0.7$; б – $h_0/r=0.8$; в – $h_0/r=0.9$

Для другого етапу програми досліджень фактори впливу набували таких же самих значень як і на першому етапі, співвідношення $h_o/r=0.9$. Кут β при цьому обраховувався на підставі величини кута α за приведеним у теоретичній частині аналітичним виразом (28). Правило п'ятикратного повторення експерименту для кожного варіанту значення кутів зберігалось для даного етапу. На цьому етапі досліджувалась кінцева швидкість зерна (рис. 6) при сході з каналу.

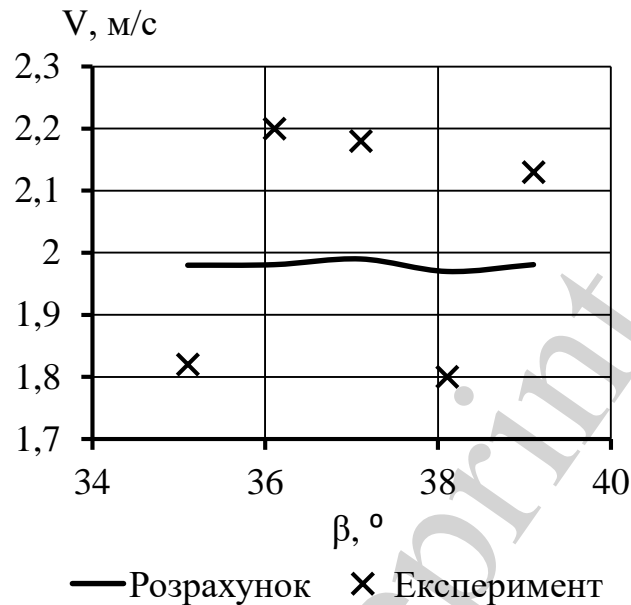


Рис. 6. Швидкість руху зерна в моменту його сходу з гвинтового каналу

Результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню максимальної та кінцевої швидкості руху зерна та їх відповідна статистична обробка наведені в табл. 1–3.

Таблиця 1

Результати експериментів по визначенню максимальної швидкості руху на розгінній ділянці ($h_o/r=0.7$)

Кут α	Максимальна швидкість V_{\max} , м/с					Максимальна швидкість V_{\max} , середня	Дисперсія дослідів D_i	Теоретична максимальна швидкість V_{\max} , м/с	Відносна похибка, δ , %
41	2,39	2,40	2,47	2,32	2,43	2,40	0,0032	2,31063	4,0
42	2,10	2,08	2,00	2,30	2,31	2,16	0,0194	2,34355	7,9
43	2,21	2,31	2,36	2,17	2,24	2,26	0,0057	2,37837	5,1
44	2,39	2,26	2,47	2,48	2,34	2,39	0,0083	2,41493	1,1
45	2,69	2,81	2,56	2,62	2,68	2,67	0,0087	2,45312	8,9
Похибка експерименту							0,09513		
Максимальна дисперсія, D_{\max}							0,01944		
Сума дисперсій, ΣD							0,04525		
Спостережене значення критерію Кохрена, G							0,42957		

Таблиця 2

Результати експериментів по визначенню поточної швидкості руху зерна в моменту його сходу з гвинтового каналу ($h_0/r=0.9$)

Кут α	Кут β	Кінцева швидкість $V_{\text{кін}}$, м/с					Кінцева швидкість $V_{\text{кін}}$, середня	Дисперсія дослідів D_i	Теоретична кінцева швидкість $V_{\text{кін}}$, м/с	Відносна похибка, δ , %
41	39	1,98	1,9	2,6	2,3	1,9	2,14	0,0945	1,980909	7,8
42	38	1,8	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	0,005	1,970000	8,6
43	37	2,1	2,2	2,2	2	2,4	2,18	0,022	1,990000	9,5
44	36	2,1	2,2	2	2,4	2,3	2,2	0,025	1,980909	11,1
45	35	1,7	1,7	1,8	1,8	2,1	1,82	0,027	1,980000	8,1
Похибка експерименту								0,18627		
Максимальна дисперсія, D_{max}								0,09448		
Сума дисперсій, ΣD								0,17348		
Спостережене значення критерію Кохрена, G								0,54462		

Таблиця 3

Результати дослідження значень залишків експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості руху зерна в момент сходу з каналу

Залишки $V_{\text{кінц}}$, м/с				
-0,01	0,080909	-0,61909	-0,31909	0,080909
0,180909	0,180909	0,280909	0,180909	0,080909
-0,11	-0,21	-0,21	-0,01	-0,41
-0,11909	-0,21909	-0,01909	-0,41909	-0,319091
0,28	0,28	0,18	0,18	-0,12
Відносні похибки, %				
0,505051	4,258362	23,8112	13,87353	4,25836
10,05049	10,05049	16,52405	10,05049	4,25836
5,238095	9,545455	9,545455	0,5	17,0833
5,671006	9,958687	0,954556	17,46213	13,8735
16,47059	16,47059	10	10	5,71429
Середня відносна похибка, %			9,85	
Математичне сподівання			-0,05	
Дисперсія			0,061	
Довірчий інтервал			(-0,54; 0,451)	
Сума квадратів залишків			1,52643	
RS критерій нормального розподілу			3,57 \in (3,34; 4,53)	

6. Обговорення результатів розробки моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу

6.1. Обговорення геометричних параметрів гвинтового каналу та кінематичних параметрів руху зерна за результатами теоретичних досліджень

Збільшення швидкості у верхній частині каналу обумовлено потребою забезпечити утворення накопичення зерна на розгінній ділянці та не пересипання його через краї відкритого зернового каналу. Така комбінація забезпечує суттєвий приріст швидкості зернового вантажу на першій ділянці ПВГК. Розгінна ді-

лянка 4 ПВГК (рис. 2) повинна мати якомога більший кут нахилу α до горизонту, а гальмівна ділянка 5 з кутом нахилу β , повинна бути меншою від кута α . Обґрунтування співвідношення даних кутів слідує із формул (23)–(26) та (28).

Зменшення кута нахилу з α на β при переході з однієї ділянки каналу на іншу дає можливість суттєво зменшити швидкість гравітаційного спуску. Зменшення швидкості запобігає виникненню критичних ударних сил зернинок об стіну та бетонне дно силосу, що в свою чергу зменшує або повністю усуває його механічне травмування.

Кут нахилу гальмівної ділянки β повинен бути більшим від кута тертя зерна сільськогосподарської культури ξ [17], яке завантажується у силос. Ця умова забезпечує сталий рух зернового вантажу по поверхні каналу. Отже, вибір і співвідношення кутів нахилу розгінної та гальмівної ділянок ПВГК залежить від формули (28) та конкретного сорту зерна з відповідним кутом тертя ξ .

Для переважної більшості різновидів зерна сільськогосподарських культур кут тертя лежить в межах від 15° до 25° в залежності від фізико-механічних властивостей та рівня зволоженості зернової маси. Зважаючи на це, формуючи кути ключових ділянок ПВГК повинні бути більшими від вказаного кутового діапазону, тобто для гальмівної ділянки слід дотримуватися наступної вимоги $\beta > \xi$. В найбільш не вигідних умовах переміщення зернового потоку кут β приймає значення, що перевищує верхню межу діапазону варіації кута тертя, а саме – $\beta > 25^\circ$. При цьому зважаючи на взаємозалежність (28) між кутами гальмівної та розгінної ділянки ПВГК, кут α буде більшим від 41° .

Приймаючи до уваги вище приведені умови при встановленні кутів нахилу ділянок ПВГК, було проведено комплекс теоретичних розрахунків (рис. , 4) по визначенню особливостей формування геометричних характеристик гвинтового каналу та кінематичних параметрів руху зернового потоку.

З аналізу проілюстрованої залежності на рис. 3 встановлено, що головним чинником формування величини кута β є співвідношення між ключовим габаритним параметром ПВГК – радіусом r каналу та висотою падіння зерна h_o . Так, з його зростанням від 0.1 до 1 кут нахилу гальмівної ділянки, з врахуванням алгебраїчної різниці з кутом α , збільшується від нульового значення до майже 50° . Приймаючи до уваги накладені вище обмежувальні умови на значення кутів нахилу ділянок каналу, кут β слід формувати відштовхуючись від значення співвідношення h_o/r рівних 0.6...0.7 та вище. У цьому випадку даний кут буде гарантовано перевищувати обмежувальну границю у 25° .

Наступним показником, що визначає геометричну будову гвинтового каналу, є кількість витків окремо взятої ділянки каналу. Розрахунок кількості витків використовує формули (32) і (37), та сконцентрований на дотриманні та виконанні декількох умов. По-перше, геометрична висота розгінної та гальмівної ділянки не повинна перевищувати загальну висоту усього гвинтового каналу. По-друге, повинне бути певне співвідношення між ними, щоб забезпечити допустимі межі по тривалості розгону та гальмування зернового потоку.

Згідно до графічно відображених результатів розрахунків на рис. 4, кількість витків n_r при зростаючому куті α має тенденцію до майже лінійного характеру свого збільшення, не зважаючи на кількість витків ділянки розгону. Найбільш

стрімко подібне зростання n_T зі збільшення кута α відбувається при $n_p=1.2$, коли кількість витків в крайніх точках зростаючого відрізка відрізняється на 14 %. Це обумовлено жорстким співвідношенням кутів α та β в незалежності від кількості витків відповідних ділянок каналу при сталій величині відношення h_0/r .

6. 2. Обговорення результатів експериментальних досліджень та їх співставлення з даними теоретичних розрахунків

У відповідності до представлених на рис. 5 характеристик, збільшення кута α приводить до зростання швидкості переміщення, при цьому різниця швидкості в крайніх точках діапазону може відрізнятися більше за 0.4 м/с. Це в першу чергу обумовлено підвищенням рівня нахилу розгінної ділянки. Слід також відзначити, що зі збільшенням співвідношення h_0/r , темпи зростання максимальної швидкості розгону більш суттєві. Так, при двох крайніх значеннях цього співвідношення при умові однаковості кута α швидкості відрізняються від 0.1 до 0.4 м/с. Дана тенденція пояснюється збільшенням радіусу r гвинтового каналу, що прямим чином впливає на довжину розгінної ділянки і відповідно на тривалість розгону.

Експериментально було встановлено, що кут α не повинен перевищувати 45° , адже подальше його збільшення призводило до згуження зерна на початку гальмівної ділянки внаслідок швидкого гравітаційного зсуву зернового потоку по розгінному каналу. Дане твердження також підтверджується теоретично, так як відповідно до (28) при куті нахилу $\alpha > 45^\circ$ кут $\beta < 21^\circ$, що є менше за нижню межу кута природного відкосу ξ для зерен пшениці.

Із статистичної оцінки отриманих експериментальних даних (табл. 1) видно, що варіативність зміни швидкостей для кожного кута α є доволі невелика, а відхилення поточних значень від середнього показника не перевищує 10...13 %. При перевірці однорідності дисперсій досліджень було встановлено, що спостережене значення Кохрена $G=0.04525$ не перевищує його критичної величини $G_{\text{табл.}}=0.6838$, вибраного виходячи з кількості дослідів, паралельних досліджень та прийнятих факторів впливу. Це свідчить про належний рівень якості і повторюваності проведеного експерименту.

Значення похибки експерименту та відносних похибок ($<10\%$) дослідних та теоретичних значень максимальної швидкості засвідчують цілком допустимі межі відхилень для даного багатofакторного експерименту з наявною складністю його натурної реалізації.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню швидкості (рис. 6) зернового потоку при сході з гвинтового каналу приводять до аналогічних висновків. Статистична обробка результатів досліджень (табл. 2) по визначенню кінцевої швидкості також вказує на однорідність дисперсій досліджень, зокрема спостережний критерій Кохрена $G=0.5446$ не перевищує його критичне значення 0.6838. Значення кінцевої швидкості в межах одного експерименту суттєвим чином не відрізняються від їх усереднених величин. Відносні похибки не перевищують 12 %.

Статистичний аналіз експериментальних даних та значень залишків кінцевої швидкості сходу зерна (табл. 1–3) вказує на достатній рівень та точність проведених досліджень. Згідно RS критерію значення залишкового ряду є нор-

мально розподіленими для рівня значущості 0.05 та $n=25$. Однорідність дисперсій досліджень, коефіцієнт множинної кореляції експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості $R=0.998$, середня відносна похибка залишків 9.85 % та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі. Співставлення теоретичних та експериментальних значень максимальної та кінцевої швидкості руху зерна за величиною відносних похибок також вказує на прийнятний рівень точності представленої теоретичної моделі.

У ході проведених експериментів було виявлено, що кінцева швидкість сходу зерна з каналу (рис. 6) знаходилась в межах від 1.8 м/с до 2.2 м/с при середніх розрахункових значеннях біля 1.98 м/с. Дана кінцева швидкість є близькою до початкової, що свідчить про правильність співвідношень між кутами α і β (23)–(28), та достовірність розробленої аналітичної моделі (40).

Проведений аналіз свідчить, що розроблена модель та відповідний ПВГК за рахунок двох змінних кутів спіралей вирішує проблему контрольованого зменшення швидкості руху зерна для його завантаження у силоси без травмування, на відміну від [26, 27]. Одночасно запропонований ПВГК не має громіздкої конструкції у порівнянні з [22–24] та не викликає ефектів сегрегації як у [19, 20].

До певних недоліків представленої моделі можна віднести наступне: модель не враховує опір повітря, силу Коріоліса та зміщення зерна від центра жолоба в наслідок дії відцентрової сили. Ці недоліки є незначними через невелику швидкість руху зерна і не впливають на кінцевий результат. Також виникають об'єктивні труднощі, щодо визначення оптимального співвідношення кутів розгінної та гальмівної ділянок для різних зернових культур. Для забезпечення стаціонарного потоку зернової маси потрібно враховувати кут природного відкосу зерна, що залежить від сорту зернової культури.

Перспективами подальших досліджень є вивчення доцільності розробки ПВГК з трьома різними кутами нахилу, а також дослідження потреби виготовлення ПВГК з різних матеріалів, залежно від їх фрикційних властивостей.

7. Висновки

1. Розроблено та обґрунтовано теоретичну модель гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Модель дає змогу знаходити швидкість руху зерна у будь-який момент часу t , враховує радіус каналу r , висоту отвору бункера h_0 від краю розгінної ділянки, коефіцієнт тертя μ та кути нахилу спіралей α і β розгінної та гальмівної ділянок.

2. Знайдено співвідношення між кутами α і β нахилу розгінної і гальмівної ділянок. Дана залежність забезпечує проходження зерна без його згруження на будь-якій ділянці каналу та водночас запобігає травмуванню зернової маси за рахунок контрольованого зменшення кінцевої швидкості.

3. Досліджено параметри представленої аналітичної моделі, а саме: наведено вирази для визначення часу проходження зерном розгінної t_p та гальмівної t_r ділянки, а також залежність для знаходження кількості витків n_r гальмівної ділянки відносно довільної кількості витків n_p розгінної ділянки.

4. На основі аналітичної моделі запропоновано технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу. Для даного каналу обґрунтовано значення

рекомендованих кутів $41^{\circ} \dots 45^{\circ}$ для розгінної та $39^{\circ} \dots 35^{\circ}$ для гальмівної ділянок відповідно, а також відношення h_0/r , що повинно бути не менше 0.6...0.7.

5. Порівняно результати досліджень руху озимої пшениці вологістю 14 % в ПВГК з розрахунковими даними розробленої моделі. Статистичний аналіз теоретичних та експериментальних даних засвідчив адекватність та прийнятну точність запропонованої моделі. Відмінність отриманих результатів не перевищує 13 %. Це дає можливість застосування моделі для подальших дослідницьких цілей.

Література

1. Kong, E., Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X. et. al. (2013). Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*, 1 (1), 43–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2013.07.012>
2. Комченко, Е. В., Басюк, С. П. (2003). Влияние материала стенок бункера на истечение различных сыпучих материалов. *Энергосбережение и энергосберегающие технологии в АПК*, 1, 145–149.
3. Горюшинский, И. В., Мосина, Н. Н. (2001). К вопросу оценки процесса загрузки емкостей сыпучими материалами. *Сборник научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых СамИИТ*, 3, 83–84.
4. Арендаренко, В. М., Антонець, А. В., Савченко, Н. К., Самойленко, Т. В., Иванов, О. М. (2020). Розрахункова модель гравітаційного руху зернового матеріалу в похилому каналі з дискретно змінним кутом нахилу. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 4, 273–282. doi: <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.35>
5. Самойленко, Т. В., Арендаренко, В. М., Антонець, А. В. (2020). Кінематика руху зерна по спіральному пристрою зі змінним кутом спуску. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 1, 267–274. doi: <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.01.31>
6. Горюшинский, И. В., Мосина, Н. Н. (2003). Повышение качества функционирования бункерных хранилищ улучшением их загрузки. Пути повышения эффективности АПК в условиях вступления России в ВТО. *Материалы международной научно-практической конференции (к XIII международной специализированной выставке «АГРО-2003»)*, 343–345.
7. Тарасенко, А. П., Оробинский, В. И., Гиевский, А. М., Баскаков, И. В., Чернышов, А. В., Харитонов, М. К. (2019). Снижение травмирования зерна при послеуборочной обработке. *Вестник аграрной науки Дона*, 1, 63–68. URL: <https://readera.org/140243652>
8. Тарасенко, А. П., Оробинский, В. И., Гиевский, А. М., Мерчалова, М. Э. (2012). Совершенствование средств механизации для получения качественного зерна. *Вестник Воронежского государственного аграрного университет*, 3, 109–115.
9. Тарасенко, А. П., Жарких, В. Ю. (2015). Обзор технических решений для равномерной загрузки зерноочистительных машин. *Научно-исследовательские публикации*, 1 (3 (23)), 76–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnicheskikh-resheniy-dlya-ravnomernoy-zagruzki-zernoochistitelnyh-mashin/viewer>

10. Страна, И. Г. (1974). Травмирования семян зерновых культур и урожаяев. Биология и технология семян, 2, 122–129.
11. Чазов, С. А., Шеляпень, П. А., Воцкий, З. З. (1981). Травмирования семян и пути снижения при механизированной обработке, обмолоте, сортировании. Украинские нивы, 8, 41–43.
12. Дерев'янюк, Д. А., Сукманюк, О. В., Сарана, В. В., Дерев'янюк, О. Д. (2020). Обґрунтування впливу робочих органів зернозбиральних комбайнів на пошкодження і якість насіння. Вісник аграрної науки, 92 (2), 64–71. doi: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-10>
13. Черный, А. С. (1973). Пути снижения повреждаемости семян при работе зерновой нории НЗ-20. Труды ЧИМЭСХ, 62, 270–275.
14. Купреенко, А. И., Исаев, Х. М., Бычков, И. Е. (2019). Повышение эффективности загрузки емкостей сельскохозяйственного назначения. Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения, 1 (18), 462–469.
15. Fraczek, J., Ślpek, Z. (1999). Fatigue strength of wheat grains. Part 1. The analysis of grain deformation at multiple loads. International Agrophysics, 13 (1), 93–97. URL: <http://www.international-agrophysics.org/Fatigue-strength-of-wheat-grains-Part-1-The-analysis-of-grain-deformation-at-multiple,106935,0,2.html>
16. Omarov, A., Müller, P., Tomas, J. (2013). Influence of loading rate on the deformation and fracture behavior of wheat grains. Chemie Ingenieur Technik, 85 (6), 907–913. doi: <https://doi.org/10.1002/cite.201200054>
17. Борщев, В. Я., Долгунин, В. Н. (2006). Характеристики сдвигового потока зернистой среды и рекомендации по организации технологических процессов. Вестник Тамбовского государственного технического университета, 12 (2А), 401–407. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-sdvigovogo-potoka-zernistoy-sredy-i-rekomendatsii-po-organizatsii-tehnologicheskikh-protsessov/viewer>
18. Долгунин, В. Н., Борщев, В. Я. (2006). Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение. Москва: Машиностроение.
19. Сэвидж, С. (1985). Гравитационное течение несвязанных гранулированных материалов в лотках и каналах. Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений. М.: Мир, 86–146.
20. Leuthe, F., Eisenhauer, N., Hofmann, B., Maier, M., Roth, K. (2017). The movement of a dune of non-uniform grain size in a circular pipe flow. 18th International Conferences on Transport and Sedimentation of Solid Particles, 185–192.
21. Мельник, В. І., Самойленко, Т. В. (2018). Аналіз напрямів удосконалення конструкцій пристроїв для завантаження силосів. Інженерія природокористування, 1 (9), 83–90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2018_1_13
22. Dancey, C. L., Diplas, P., Papanicolaou, A., Bala, M. (2002). Probability of Individual Grain Movement and Threshold Condition. Journal of Hydraulic Engineering, 128 (12), 1069–1075. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:12\(1069\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:12(1069))
23. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Zaharova, T., Pavlenko, O., Klendiy, M. (2019). The Investigation of Particle Movement on a Helical Surface. Advances in

Design, Simulation and Manufacturing II, 671–681. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_67

24. Ren, J.-L., Zhou, J.-N., Han, L., Hu, Y.-J. (2018). Analysis of the Law Governing the Movement of Bulk Materials in a Vertical Helical Conveyor. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 33 (6), 77–82. doi: <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.06.013>

25. Борщев, В. Я., Долгунин, В. Н., Дронова, М. Ю. (2005). Каскадная гравитационная сепарация зернистых материалов: Особенности технологии и моделирование. *Вестник ТГТУ*, 4, 903–909. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kaskadnaya-gravitatsionnaya-separatsiya-zernistykh-materialov-osobennosti-tehnologii-i-modelirovanie/viewer>

26. Антипов, С. Т., Журавлев, А. В., Нестеров, Д. А., Посмерьев, В. В. (2015). Математическое моделирование движения зерна проса в сушильном аппарате со взвешенно-закрученным слоем. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*, 4, 46–53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-dvizheniya-zerna-prosa-v-sushilnom-apparate-so-vzveshenno-zakruchennym-sloem/viewer>

27. Negi, S. C., Lu, Z., Jofriet, J. C. (1997). A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 2: Model Validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68 (3), 231–236. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0197>

28. Ukolov, A., Dolgunin, V., Romaanof, A., Klimov, A. (2001). Gravity separation technology of particulate materials of high uniformity. *International Conference on Practical Aspects Technology*, 215–218.

29. Шацкий, В. П., Оробинский, В. И., Попов, А. Е. (2015). Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 4, (47), 72–79. URL: <http://vestnik.vsau.ru/wp-content/uploads/2015/11/72-79.pdf>

30. Морозов, І. В., Дудін, О. В. (2003). Модель траєкторії руху зерна по поверхнях сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Механізація сільськогосподарського виробництва»*, 21, 124–131.

31. Гевко, Б. М. (2012). Математична модель руху зерна по рухомим поверхням висівних апаратів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Технічні науки*, 1 (11), 113–118.

32. Леженкін, О., Головльов, В., Михайленко, О., Рубцов, М. (2019). Математична модель руху часточки обчисаного вороху зернових у повітряному потоці. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 19 (3), 14–21. URL: <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/236>

33. Науменко, М. М., Сокол, С. П., Філіпенко, Д. В., Гурідова, В. О. (2017). Математична модель руху зернової суміші в циліндричному решеті, що обертається навколо осі. *Геотехнічна механіка*, 133, 250–256.